

Гидрохимический режим и донные осадки предгорных озер Русского Алтая

Д.М. Безматерных  , О.Н. Вдовина 

 bezmater@mail.ru

ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения
Российской академии наук», г. Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние десятилетия значительно выросла антропогенная нагрузка на предгорные озера Алтая, особенно – рекреационная. Однако гидрохимический режим и донные осадки большинства этих озер не изучены. **Методы.** В разные гидрологические сезоны 2022 г. исследованы основные гидрохимические характеристики и донные осадки шести предгорных озер: Ая, Белое, Киреево, Кокша, Колыванское и Светлое. Пробы донных осадков отобраны в конце мая-начале июня параллельно с гидрохимическими исследованиями. **Результаты.** Определена сезонная динамика гидрохимических характеристик. На химический состав поверхностных вод изученных озер наибольшее влияние оказали физико-географические характеристики их водосборов и особенности антропогенного воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Алтайский край, водоемы, низкоргорные озера, рекреационное воздействие, донные грунты, качество воды.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИВЭП СО РАН (регистрационный № 121031200178-8).

Для цитирования: Безматерных Д.М., Вдовина О.Н. Гидрохимический режим и донные осадки предгорных озер Русского Алтая // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 32–45. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-32-45.

Дата поступления 18.05.2023.

HYDRO/CHEMICAL REGIME AND BOTTOM SEDIMENTS OF FOOTHILL LAKES OF THE RUSSIAN ALTAI

Dmitry M. Bezmaternykh  , Olga N. Vdovina 

 bezmater@mail.ru

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

ABSTRACT

Relevance. Anthropogenic pressure on the Altai foothills lakes, especially recreational load, has increased significantly in recent decades. However, the hydro/chemical regime and bottom sediments for most of these lakes have not been studied. **Methods.** During different hydrological seasons of 2022 we studied the main hydro/chemical characteristics and bottom sediments of 6 foothill lakes were studied (Aya, Belaye, Kireevo, Koksha, Kolyvanskoye, and Svetloye). We took samples of bottom sediments in late May – early June, 2022 concurrently with hydro/chemical studies. **Results.** Seasonal dynamics of hydro/chemical parameters was determined. The chemical composition of the surface waters of the studied lakes was most influenced by the

physical and geographical characteristics of their catchment areas and the peculiarities of the anthropogenic influence on the lakes.

Keywords: Altay Kray, reservoirs, low-mountain lakes, recreational impact, bottom soils, water quality, dynamics

Financing: This study was carried out as part of State Assignment (no. 121031200178-8).

For citation: Bezmatrnykh D.M., Vdovina O.N. Hydro/chemical regime and bottom sediments of foothill lakes of the Russian Altay in 2022. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 32–45. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-32-45.

ВВЕДЕНИЕ

Алтай – самая высокая горная область Южной Сибири. Хребты его центральных и восточных районов поднимаются выше 3–4 км, они покрыты вечными снегами и ледниками. На Русском (Горном) Алтае насчитывается более 3500 озер, но только 75 из них имеют площадь свыше 1 км² [1]. К категории предгорных относят 102 озера Алтайского края и Республики Алтай [2].

Озера являются аккумулятивными геосистемами, которые сильно зависят от состояния их водосборных бассейнов [3], обусловленного как природными, так и антропогенными факторами, что позволяет использовать эти водоемы как чувствительные индикаторы региональных экологических изменений. Таким образом, физические и химические характеристики воды и донных осадков озер являются показателями экологического состояния не только самих озер, но и их водосборных бассейнов. Эти же показатели во многом определяют устойчивость озерных экосистем, потенциал самоочищения, темпы и направленность их сукцессий.

Гидрохимические характеристики и донные осадки большинства озер Алтая не изучены или малоизучены. В настоящее время на многие из этих водоемов, особенно на предгорные (низкогорные), значительно возросла рекреационная нагрузка. Водосборные бассейны исследованных озер интенсивно используются в рекреационных и сельскохозяйственных целях.

Цель исследования – изучить гидрохимический режим и донные осадки предгорных озер Русского Алтая для оценки состояния их экосистем в условиях современных антропогенных воздействий и изменений климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно ГОСТ Р 59054-2020¹ все изученные озера по площади водного зеркала относятся к категории малых, а по максимальной глубине – к средним (оз. Ая), малым (озера Белое и Киреево) и очень малым (остальные) [4]. Их высота над уровнем моря находится в пределах 207–537 м (табл. 1).

Озеро Ая расположено в горной впадине на левом берегу р. Катунь. Ая – уникальный, единственный в своем роде, природный объект Алтая, до сих пор достоверно не установлен генезис озерной котловины [5]. Озеро относится к бессточным, оно не имеет поверхностного питания за счет выпадающих и вытекающих ручьев и рек. Котловину наполняют подземные источники. Водоем

¹ГОСТ Р 59054-2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов.

является излюбленным местом отдыха туристов, на водосборе озера расположено более 40 баз отдыха, соответственно, высока степень антропогенного воздействия [6].

Таблица 1. Основные характеристики исследованных озер

Table 1. Main characteristics of the studied lakes

Озеро	Характеристики				
	Координаты	Площадь, га	Макс. глубина, м	Средняя глубина, м	Высота, м н.у.м.
Ая	51°54'15" с. ш. 85°51'13" в. д.	8,6	21,34	12,6	321
Белое	51°17'40" с. ш. 82°38'50" в. д.	299,0	6,87	4,6	537
Киреево	52°08'12" с. ш. 86°12'21" в. д.	39,5	5,22	2,1	251
Кольванское	51°21'50" с. ш. 82°11'30" в. д.	471,6	2,76	2,2	332
Кокша	52°18'39" с. ш. 85°43'51" в. д.	22,7	1,38	0,9	209
Светлое	52°17'37" с. ш. 85°39'01" в. д.	26,2	1,48	1,06	207

Озеро Киреево находится в Красногорском районе Алтайского края, оно зарегулировано дамбой на р. Ташта. Озеро также испытывает значительную рекреационную нагрузку, на его берегах расположено несколько туристических баз. Размерные характеристики озера очень малы, поэтому для него характерна высокая антропогенная нагрузка.

Озера Белое и Кольванское – тектонического происхождения, их отличительной особенностью являются многочисленные нагромождения скал – гранитных останцев различной формы. Озера привлекательны для туристов и в настоящее время для них характерна средняя степень антропогенного воздействия (оз. Белое – рекреационная и селитебная нагрузка, оз. Кольванское – рекреационная нагрузка) [7].

Озера Кокша и Светлое расположены в бассейне р. Кокша на Предалтайской равнине в районе луговых степей Северного Алтая и древней террасы р. Катунь. При небольшой площади водосбора, отсутствии впадающих ручьев (рек) и отрицательном балансе «осадки–испарение» озера имеют обильное питание, которое обусловлено подземными водами [8]. Фактически р. Кокша является протокой Катунь, часть которой в виде подземного потока скрыта под землей на глубинах до 25–30 м [9]. Из-за обилия ключей, бьющих со дна и питающих водоемы грунтовыми водами, зимой они не замерзают даже в сильные морозы, температура воды не опускается ниже +5 – +6 °С. Благодаря этому озера и незамерзающие части рек являются одним из немногих в регионе (и единственным таких масштабов) местом зимовки водоплавающих птиц, особенно лебедя-кликуна. Для оз. Светлое характерна средняя степень антропогенного воздействия (рекреационное воздействие), для оз. Кокша – относительно низкая (сельскохозяйственное воздействие).

В разные гидрологические сезоны (май-июнь, июль, сентябрь) 2022 г. исследованы основные гидрохимические характеристики шести предгорных озер Русского Алтая: Киреево Красногорского района, Ая (Айское) Алтайского района, Кокша и Светлое (Лебединое) Советского района, Колыванское Змеиногорского района, Белое Курьинского района Алтайского края (рис. 1). Пробы донных осадков были отобраны в конце мая – начале июня 2022 г. параллельно с гидрохимическими исследованиями. Всего отобрано 56 проб воды и 20 проб донных осадков. Прозрачность воды замеряли по белому диску Секки диаметром 20 см. Пробы воды отбирали с приповерхностного горизонта в пластиковую тару 1,5 л. Донные осадки собирали дночерпателем Петерсена.

Материал для исследований собирали и обрабатывали по стандартным гидрохимическим методикам [10, 11]. Гранулометрический анализ донных отложений выполнен в соответствии с ГОСТ 12536-2014². Камеральная обработка гидрохимических проб и проб донных осадков проведена в лаборатории биогеохимии, хлорофилла «а» – в лаборатории гидробиологии ИВЭП СО РАН в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02-90³. Статистический анализ полученных данных осуществлен в программе Statistica-12.

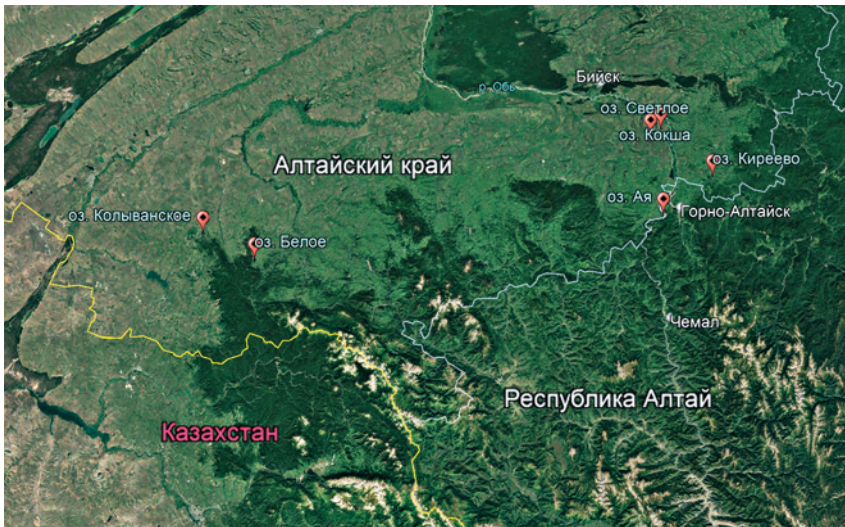


Рис. 1. Расположение исследованных озер.
Fig. 1. Location of the studied lakes.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Донные осадки. Для всех изученных озер характерно преобладание илистых грунтов (табл. 2). По классификации современных терригенных осадков Н.М. Страхова [12] в озерах Ая и Кокша преобладали черные мелкоалевритовые илы, в оз. Светлое – черные крупноалевритовые илы, в оз. Колыванском – темно-серые глинистые и мелкоалевритовые илы, в озерах Белое и Кирее-

²ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

³ГОСТ 17.1.4.02-90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а».

во – серые глинистые илы. В оз. Светлом выявлены участки дна, покрытые полуразложившимся комбикормом, которым служащие заказника обильно подкармливают зимующих здесь лебедей. Наименьшее содержание органического углерода отмечено в оз. Киреево, наибольшее – в оз. Ая. В центральной части оз. Ая выявлены жидкие черные илы с запахом сероводорода. Донные осадки изученных водоемов характеризовались небольшим содержанием органических веществ по типизации Н.В. Кордэ [13], т. е. относились к минеральным осадкам [14], только осадки оз. Ая можно охарактеризовать как переходные между минеральными и органоминеральными.

Таблица 2. Основные физические и химические показатели донных осадков исследованных озер, %

Table 2. Main physical and chemical indicators of bottom sediments in the studied lakes, %

Показатели	оз. Киреево	оз. Ая	оз. Кокша	оз. Светлое	оз. Белое	оз. Колыванское
$C_{орг.}$	1,2±0,4	10,2	6,8±1,5	3,1±1,7	7,6±2,4	5,0±1,2
Гранулометрический состав (размер частиц), мм:						
1–0,25	<0,01	5,75	3,08±0,85	16,05±9,76	7,59±2,04	1,73±0,37
0,25–0,05	5,89±1,09	24,65	23,90±3,22	43,59±14,58	17,88±5,35	18,09±3,56
0,05–0,01	43,01±11,50	39,24	47,91±5,67	20,24±9,18	25,01±10,04	39,57±3,48
0,01–0,005	17,15±2,92	13,12	8,27±1,38	7,37±4,76	9,79±3,58	11,36±0,63
0,005–0,001	14,04±3,16	11,96	12,29±4,36	9,65±7,86	13,89±4,29	14,33±1,53
< 0,001*	19,89±4,57	5,28	4,55±1,33	3,09±1,88	8,52±4,07	14,91±0,98
< 0,01**	51,08±10,50	30,36	25,11±6,90	20,12±14,49	32,19±11,52	40,60±3,05

Примечание: * – ил; ** – физическая глина.

Гидрофизические и гидрохимические показатели. По результатам анализа проб весной 2022 г. по уровню минерализации исследованные озера являлись ультрапресными – $>0,2$ г/дм³: от 91,9 мг/дм³ (оз. Колыванское) до 156,6 мг/дм³ (оз. Белое). В соответствии с предложенной О.А. Алекиным [15] классификацией природных вод по химическому составу все изученные озера относятся к классу гидрокарбонатных, кальциевой группы (табл. 3). Минимальная прозрачность воды наблюдалась в оз. Киреево (0,39 м), максимальная – в оз. Ая (4,18 м), на озерах Кокша и Светлое – до дна. Вода озер Северного и Северо-Восточного Алтая (Ая, Киреево, Кокша, Светлое) по величине водородного потенциала относится к нейтральной-слабощелочной (рН = 7,4 – 7,6), озер Северо-Западного Алтая (Белое и Колыванское) – слабощелочной-щелочной (рН = 8,0 – 8,6). Окислительно-восстановительный потенциал (Еh) был положительный (186–268 мВ) и соответствовал окислительным условиям. Согласно классификации О.П. Оксюк с соавторами [16], по содержанию общего фосфора озера Белое и Колыванское характеризовались как олиго-мезотрофные, Киреево, Кокша и Светлое – мезотрофные, оз. Ая – мезоэв-

трофное. Содержание нитритов во всех озерах ниже пределов обнаружения методами анализа. Концентрация нитратов достигала наибольших значений в заросшем макрофитами оз. Кокша, озерах Ая и Светлое, где служащие заказника обильно покармливают зимующих лебедей. Однако даже эти концентрации соответствуют чистым водам. На самых больших озерах Белом и Колыванском концентрация нитратов была ниже пределов чувствительности метода определения ($< 0,1 \text{ мг/дм}^3$). Общее содержание органических веществ (по величине ХПК) определено наибольшим в оз. Киреево ($15,7 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$), наименьшие величины зафиксированы в оз. Светлое ($7,4 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$). При этом содержание легкоокисляемых органических веществ (по величине БПК₅) также было наибольшим в оз. Киреево ($1,3 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$), а наименьшим – в оз. Ая ($0,7 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$). Содержание хлорофилла «а» в воде соответствовало олиготрофным (озера Ая, Белое, Кокша и Светлое), мезотрофным (Колыванское) и эвтрофным (Киреево) водоемам.

Летом 2022 г. отчетливо проявилась разница в температурном режиме исследованных озер. Температура озер Кокша и Светлое была примерно в два раза ниже ($10,2\text{--}10,7 \text{ }^\circ\text{C}$), чем в остальных озерах ($20,2\text{--}21,2 \text{ }^\circ\text{C}$). Минимальная прозрачность воды по-прежнему наблюдалась в оз. Киреево (немного увеличилась – $0,48 \text{ м}$), максимальная – в оз. Ая (существенно уменьшалась – $1,58 \text{ м}$), а на озерах Кокша и Светлое – также до дна. Во всех озерах (кроме Колыванского) Eh несколько возрос и соответствовал окислительным условиям. Уровень минерализации воды существенно не изменился. В озерах Киреево и Кокша она возросла на $9,6\text{--}17,1 \text{ мг/дм}^3$, в остальных озерах незначительно понизилась на $1,0\text{--}9,1 \text{ мг/дм}^3$. Тип минерализации не изменился. Величина pH воды большинства озер незначительно повысилась, а в озерах Кокша и Светлое осталась без статистически значимых изменений. По содержанию общего фосфора оз. Колыванское стало мезоэвтрофным, остальные озера – олигомезотрофными. Концентрации нитратов в озерах Кокша и Светлое достоверно не изменились. В озерах Белое и Колыванское концентрация нитратов значительно возросла (до $0,71\text{--}1,14 \text{ мг/дм}^3$), а в оз. Ая значительно уменьшилась и стала ниже пределов обнаружения. Величина ХПК существенно возросла и достигала $20,8 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ (вода «удовлетворительной чистоты») в оз. Ая, наименьшие показатели отмечены в оз. Белое – $15,8 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ (класс «чистые воды»). При этом величина БПК₅ была наибольшей (превышала ПДК_{рх}) в озерах Киреево ($2,5 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$) и Колыванское, а наименьшей – в оз. Белое ($0,6 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$), что в обоих случаях соответствовало предельно чистым водам. Содержание хлорофилла «а» в воде во всех озерах понизилось существенно и соответствовало олиготрофным (озера Ая, Белое, Кокша и Светлое), олигомезотрофным (Колыванское) и мезотрофным (Киреево) водоемам.

Осенью 2022 г. максимальная прозрачность воды увеличилась в оз. Белое ($2,12 \text{ м}$), а минимальная – в озерах Колыванское ($0,70 \text{ м}$) и Киреево ($0,72 \text{ м}$). Eh в исследованных озерах незначительно изменился, но по-прежнему соответствовал окислительным условиям. Минерализация воды во всех озерах несколько повысилась, но осталась в пределах ультрапресной зоны.

Таблица 3. Основные физические и химические показатели воды исследованных озер

Table 3. Main physical and chemical parameters of the water in the studied lakes

Показатель	оз. Киреево	оз. Ая	оз. Кокша	оз. Светлое	оз. Белое	оз. Кольванское
27.05.2022 г. – 01.06.2022 г.						
Прозрачность, м	0,39±0,09	4,18±0,09	до дна	до дна	2,1±0,2	0,7±0,1
Eh, мВ	201±14	210±6	221±4	219±6	186±9	268±12
pH	7,4±0,0	7,5±0,2	7,6±0,01	7,5±0,1	8,0±0,1	8,6±0,1
Минерализация, мг/дм ³	115,0±3,2	110,0±6,3	107,8±1,7	119,3±3,9	156,6±14,6	91,9±0,9
CO ₃ ²⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	79,3±0,0	75,2±5,4	73,2±5,3	81,3±2,0	112,0±8,4	62,6±0,9
Cl ⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	11,5±0,6	10,6±0,0	15,8±0,0	15,8±0,0	<10	<10
Ca ²⁺ , мг/дм ³	17,3±1,3	14,7±3,7	15,3±1,8	20,0±3,1	26,5±5,1	15,5±0,5
Mg ²⁺ , мг/дм ³	7,2±0,7	8,0±1,6	6,8±1,4	6,0±2,1	8,4±0,9	4,8±0,0
ΣNa ⁺ +K ⁺ , мг/дм ³	1,4±0,3	2,3±0,1	2,0±0,3	1,4±0,3	1,0±0,0	1,7±0,0
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,25±0,04	0,30±0,00	3,04±0,48	2,97±0,59	<0,10	<0,10
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0,14±0,09	0,09±0,02	0,05±0,00	0,06±0,01	0,09±0,00	0,15±0,06
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,009±0,007	0,022±0,010	0,017±0,002	0,009±0,004	0,015±0,000	<0,002
P общий, мг/дм ³	0,032±0,009	0,061±0,023	0,047±0,017	0,037±0,014	0,021±0,010	0,015±0,001
ХПК, мгО ₂ /дм ³	15,7±1,9	7,9±0,3	8,2±3,1	7,4±1,6	12,7±2,7	14,7±2,2
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	1,3±0,03	0,7±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	1,1±0,1
ПО, мгО/дм ³	2,9±0,1	3,7±0,6	6,9±0,3	7,2±0,3	4,6±0,3	2,0±0,3
Хл. "а", мг/м ³	25,63±6,36	3,04±0,61	0,55±0,08	0,34±0,08	5,29±0,72	13,55±0,94
20.07.2022 – 26.07.2022 г.						
Температура	21,2±0,8	21,2±0,1	10,7±1,0	10,2±1,1	22,6±0,6	20,2±0,6
Прозрачность, м	0,48±0,01	1,58±0,10	до дна	до дна	1,34±0,08	0,22±0,03
Eh, мВ	267±26	269±6	300±26	349±4	209±7	248±21
pH	7,6±0,1	8,2±0,1	7,6±0,1	7,4±0,0	8,4±0,2	8,6±0,0
Минерализация, мг/дм ³	132,1±2,3	106,1±3,8	117,4±2,7	113,5±2,7	147,5±5,9	90,9±0,2
CO ₃ ²⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	95,6±2,03	70,2±3,52	80,4±2,0	79,3±1,8	105,7±4,1	61,0±0,0
Cl ⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ca ²⁺ , мг/дм ³	22,7±0,7	18,7±0,7	22,7±0,7	22,7±0,7	24,7±1,8	16,0±0,0
Mg ²⁺ , мг/дм ³	6,4±0,4	4,8±0,7	4,0±0,8	3,6±0,0	7,2±0,7	3,6±0,0
ΣNa ⁺ +K ⁺ , мг/дм ³	1,3±0,1	2,2±0,1	1,45±0,15	<1,0	1,8±0,3	1,9±0,0
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,20±0,03	<0,10	3,20±0,42	3,18±0,27	1,14±0,56	0,71±0,06
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0,24±0,03	0,14±0,02	0,20±0,01	0,11±0,00	0,09±0,02	0,58±0,09
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,009±0,001	0,006±0,001	0,005±0,001	0,006±0,001	0,007±0,002	0,028±0,005
P общий, мг/дм ³	0,024±0,002	0,017±0,004	0,017±0,003	0,016±0,002	0,022±0,006	0,087±0,020
ХПК, мгО ₂ /дм ³	19,5±0,3	20,8±0,4	18,7±0,6	18,3±0,3	15,8±0,2	18,8±0,3

Продолжение таблицы 3.

Показатель	оз. Киреево	оз. Ая	оз. Кокша	оз. Светлое	оз. Белое	оз. Колыванское
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	2,5±0,1	2,03±0,1	1,1±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	2,5±0,2
ПО, мгО/дм ³	4,6±0,0	4,5±0,1	9,4±0,3	9,9±0,1	5,5±0,1	2,5±0,1
Хл. «а», мг/м ³	16,42±1,59	3,07±0,40	0,59±0,10	0,44±0,17	4,13±1,31	51,86±15,64
05.09.2022 г. – 10.09.2022 г.						
Температура	18,5±0,3	18,8±0,3	7,6±1,4	8,8±0,7	19,6±0,2	19,5±0,5
Прозрачность, м	0,72±0,02	1,18±0,09	до дна	до дна	2,12±0,06	0,70±0,06
Ен, мВ	271±14	283±5	274±9	317±1	252±17	271±19
рН	7,8±0,0	8,3±0,1	7,5±0,0	8,0±0,1	7,9±0,0	7,7±0,0
Минерализация, мг/дм ³	149,7±1,5	109,5±1,2	140,7±2,0	149,4±5,4	169,7±5,7	106,3±1,1
СО ₃ ²⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
НСО ₃ ⁻ , мг/дм ³	108,8±1,0	70,2±1,8	98,6±1,0	104,7±3,7	123,0±4,4	71,2±2,0
Сl ⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ca ²⁺ , мг/дм ³	24,0±1,6	15,3±0,7	25,3±0,7	30,7±1,3	32,7±0,7	20,0±0,0
Mg ²⁺ , мг/дм ³	6,8±0,4	7,2±0,7	4,4±0,4	3,6±0,0	6,0±1,4	3,6±0,0
ΣNa ⁺ +K ⁺ , мг/дм ³	3,6±0,4	3,0±0,7	3,9±0,2	1,8±0,1	1,1±0,0	1,8±0,2
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,67±0,12	0,40±0,03	2,57±0,22	3,56±0,13	0,40±0,02	0,23±0,02
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0,12±0,01	0,07±0,00	<0,05	0,12±0,01	0,21±0,02	0,56±0,03
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,003±0,001	0,008±0,000	<0,002	<0,002	0,019±0,000	0,011±0,005
Р общий, мг/дм ³	0,010±0,001	0,017±0,006	0,007±0,001	0,007±0,001	0,022±0,016	0,030±0,014
ХПК, мгО ₂ /дм ³	21,2±1,6	24,1±1,3	19,6±1,1	13,8±0,26	16,5±0,3	24,2±5,6
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	2,2±0,1	1,8±0,1	1,0±0,1	0,5±0,0	0,5±0,1	2,2±0,1
ПО, мгО/дм ³	5,3±0,1	4,7±0,1	5,6±0,1	6,7±0,6	6,7±0,34	5,4±0,0
Хл. «а», мг/м ³	12,37±1,91	1,25±0,32	0,46±0,12	0,26±0,06	2,16±0,17	8,54±1,32

Тип минерализации не изменился. В рН воды изученных озер наблюдались небольшие разнонаправленные изменения. Содержание общего фосфора в озерах Ая и Белое осталось без значимых изменений, в остальных озерах существенно понизилось. Максимальных величин оно достигало в оз. Колыванском, что соответствовало олигомезотрофным водам.

Концентрация нитратов в озерах Киреево и Ая существенно повысилась («слабозагрязненные» и «достаточно чистые» разряды качества вод). В озерах Белое и Колыванское их концентрация существенно понизилась (до 0,23–0,40 мг/дм³), в озерах Кокша и Светлое изменения были не столь значительными. Величина ХПК возросла во всех озерах, кроме оз. Светлое. Максимальных значений она достигала в оз. Колыванском (класс воды «удовлетворительной чистоты»), минимальных – в оз. Светлом («чистые воды»). Величина БПК₅ незначительно снизилась во всех озерах, но в озерах Киреево и Колыванское она была близка к ПДК_{рх}. Содержание хлорофилла «а» в воде во всех озерах также существенно понизилось, максимальный уровень выявлен в оз. Киреево, который соответствовал мезотрофному статусу.

Сравнение гидрохимического состава изученных озер с помощью кластерного анализа показало, что наиболее схожи озера Кокша и Светлое, которые относятся к одной озерно-речной системе (рис. 2). К этой группе, несмотря на морфометрические отличия, ближе всего по химическому составу вод, а также географически оз. Ая. Далее к ней примыкает оз. Киреево, которое также относится к озерам Северо-Восточного Алтая, но находится на противоположной стороне относительно р. Катунь. Наиболее отличными по химическому составу вод оказались озера Северо-Западного Алтая, причем оз. Белое существенно отличается, не только от озер Северо-Восточного Алтая, но и от оз. Копыванского.

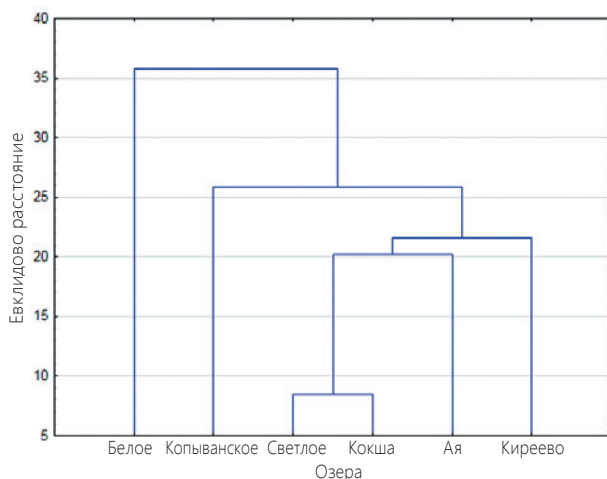


Рис. 2. Результаты кластерного анализа (single-linkage clustering) гидрохимических характеристик исследованных озер.

Fig. 2. Results of cluster analysis (single-linkage clustering) of hydrochemical characteristics for the studied lakes.

По некоторым из исследованных озер имеются ретроспективные данные о химическом составе вод, что позволяет оценить их многолетние изменения. По данным Н.Г. Селедцова [17] температура поверхностного слоя воды оз. Ая 17 сентября 1961 г. была 16 °С, летом 14–26 °С, 10 марта 1962 г. – 0 °С. Эти значения хорошо вписываются в выявленную нами сезонную динамику температуры воды. Химический состав воды 17 сентября 1961 г. также как в 2022 г. характеризовался преобладанием гидрокарбонатов. Общая минерализация составляла 185,4 мг/дм³, что существенно выше значений 2022 г. Водородный потенциал равнялся 7,7, что укладывается в диапазон изменений проведенных исследований.

По данным исследований 1971–1972 и 1997–2003 гг. [6] соотношение основных ионов в воде оз. Ая было практически таким же, как и в 2022 г. Величина рН в разные годы колебалась от 6,5 до 8,8. За 30 лет отмечено снижение концентрации гидрокарбонатов от 135 до 98,9 мг/дм³. К 2022 г. их величина еще снизилась до 70,2–75,2 мг/дм³. В 1997–1998 гг. концентрация хлоридов составляла 17,6 мг/дм³, а в 2022 г. она стала менее 10 мг/дм³. По всей вероятно-

сти, именно этим обусловлено выявленное снижение общей минерализации. Противоположная тенденция отмечена в работе Г.Г. Русанова и С.В. Важдова [5], которые считают, что в результате современных климатических изменений Алтая в сторону потепления и аридизации за 30 лет резко повысилась и минерализация воды в оз. Ая (с 88–164 до 234–240 мг/дм³), а реакция водной среды стала слабощелочной.

Концентрации нитратов, нитритов и аммония в воде оз. Ая в 1997–2022 гг. по данным разных лабораторий значительно (на порядок) отличались, что, вероятно, обусловлено особенностями методов анализа, поэтому сравнивать полученные в рамках проведенного нами исследования данные с полученными ранее результатами не представляется возможным. Летние концентрации фосфатов в 1999 г. соответствовали нашим данным. Величины ХПК, ПО и БПК₅ в эти годы колебались, но существенных отличий по сравнению с полученными данными не обнаружено.

Летом 2002 г. содержание хлорофилла «а» в воде оз. Ая соответствовало уровню мезотрофных водных объектов. Еще в начале 1960 годов оз. Ая было олиготрофным [17]. В настоящее время оно пока еще сохраняет уровень мезотрофных водных объектов. Рассчитанная оптимальная нагрузка на оз. Ая с конца XX в. превышена примерно в 10 раз. Поступление в озеро загрязняющих веществ от рекреационной деятельности, хотя и носит сезонный характер, но, тем не менее, водоем уже не в состоянии самоочищаться в полном объеме. Так, в летний период 1999 г. и 2000 г. коли-индекс воды значительно превышал санитарные нормативы. По степени загрязненности водоем можно было отнести к умеренно загрязненному и даже загрязненному [6].

В монографии [7] отмечается, что повышение температуры воды оз. Колыванское, обусловленное изменением климата, уменьшением поверхностного и подземного стоков и высокая рекреационная нагрузка, сопровождающаяся усиленным поступлением в озеро биогенных элементов, будут способствовать бурному развитию фитопланктона и растительной биомассы в целом, что особенно характерно для непроточных и слабопроточных водоемов. В результате неизбежно произойдет ухудшение качества воды и ее газового режима. Вода станет непригодной для использования, резко ухудшатся условия жизни гидробионтов, начнутся заморы рыб и бентосной фауны.

По данным В.М. Рычкова и С.И. Рычковой [9], состав основных ионов и минерализация оз. Кокша ранее (дата отбора проб не указана) существенно не отличались от результатов проведенного нами исследования. Полученные химические данные согласуются с результатами гидробиологических исследований [18–20]. Уровень видового разнообразия и обилия макробеспозвоночных, значения большинства биоиндикационных индексов свидетельствуют о неблагоприятных условиях для развития зообентоса в озерах с наибольшей рекреационной нагрузкой – Ая и Киреево, и благоприятных условиях в озерах, в наименьшей степени подверженных рекреационной нагрузке – Кокша и Светлое. Согласно большинству биоиндикационных индексов вода озер Белое и Колыванское характеризовалась как «очень чистая» и «чистая» по шкале

Росгидромета⁴. В этих озерах значимых последствий антропогенного воздействия пока не выявлено, поскольку они отличаются значительно большими размерами и, соответственно, лучшими условиями самоочищения за счет разбавляющей способности воды [21].

Как следует из представленного выше анализа, на качество поверхностных вод изученных озер наибольшее влияние оказали не морфометрические характеристики озерных котловин, а физико-географические и геоэкологические особенности (вид и интенсивность природопользования) их водосборных бассейнов. Известно, что озера являются накапливающими элементами ландшафта, их экосистемы во многом зависят от почвенных и геохимических процессов в пределах бассейна, обусловленных климатом [3]. Кроме того, в связи с активным развитием туризма на Алтае для этих водных объектов характерна высокая антропогенная нагрузка, что особенно заметно на небольших предгорных водоемах. Причем воздействие оказывается не только на экосистемы водоемов, но и на ландшафты их водосборных бассейнов [5–7].

На основании анализа полученных лимнологических данных разработаны рекомендации по рациональному использованию изученных озер. Необходимо:

- сократить рекреационную нагрузку на оз. Ая (уменьшить число отдыхающих);
- контролировать рекреационную нагрузку на оз. Киреево (ограничить дальнейшее развитие туристических объектов на берегах);
- ограничить сельскохозяйственную нагрузку на водосборе оз. Кокша (следует отодвинуть обрабатываемые сельскохозяйственные угодья от уреза воды на 300–500 м, чтобы уменьшить поступление в озеро удобрений и ядохимикатов);
- необходимо более рационально организовать кормление зимующих лебедей на оз. Светлое;
- вести контроль за рекреационной и жилой застройкой берегов озер Кольванское и Белое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованные в 2022 г. предгорные озера Алтайского края отличаются географическим положением, морфометрическими характеристиками и особенностям природопользования.

По содержанию основных ионов воды исследованных озер являются ультрапресными и относятся к классу гидрокарбонатных, кальциевой группы. По химическому составу вод наиболее схожи озера Кокша и Светлое, к ним примыкает оз. Ая, несколько больше отличается оз. Киреево; наиболее отличаются озера Белое и Кольванское. Выявленные особенности в высокой степени связаны с географическим положением изученных озер.

Для изученных гидрохимических характеристик установлена естественная внутригодовая динамика, обусловленная сменой гидрологических и биологи-

⁴ГОСТ 17.1.387-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.

ческих сезонов, а также изменением антропогенной нагрузки. Весной воды всех изученных озер по гидрохимическим показателям относились к классу «очень чистые». Летом качество вод трех озер (Ая, Киреево и Колыванское) ухудшилось за счет превышения ПДК_{рх} для БПК₅. Осенью в озерах Ая и Киреево показатель БПК₅ снизился до нормативного уровня. Для всех изученных озер характерно преобладание илистых грунтов с небольшим содержанием органических веществ, что указывает на то, что их экосистемы справляются с поступающими биогенными и органическими веществами.

Анализ многолетних данных показал, что в оз. Ая наблюдается тенденция к уменьшению концентрации основных ионов и общей минерализации воды с 1960-х годов; достоверных изменений содержания биогенных элементов и органических веществ по сравнению с данными конца 1990-х гг. и начала 2000-х гг. не выявлено.

Таким образом, исследование гидрохимического режима и донных осадков шести предгорных озер Русского Алтая дает основание в общем оценить их экологическое состояние как хорошее, отдельные признаки загрязнения проявляются только в летний период. Анализ многолетних гидрохимических показателей не позволил выявить достоверных проявлений влияния изменения климата, что также может объясняться недостаточностью их изученности. Тем не менее, по результатам анализа полученных лимнологических данных разработаны рекомендации по рациональному использованию изученных озер, которые в т. ч. включают сокращение или контроль рекреационной и сельскохозяйственной нагрузки на озера, контроль рекреационной и жилой застройки берегов, более рациональное кормление зимующих лебедей.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ИВЭП СО РАН М.С. Губарева, Е.Н. Крылову, Р.К. Свиридова и М.В. Лассого за помощь в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть. М.: Мысль, 1978. 512 с.
2. Соловов В.П. Продуктивность водоемов Алтайского края и пути их интенсивного рыбохозяйственного освоения // Биологические ресурсы внутренних водоемов Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1984. С. 13–24.
3. Россолимо А.Л. Основы типизации озер и лимнологического районирования // Накопление вещества в озерах. М.: Наука, 1964. С. 5–46.
4. Губарев М.С., Безматерных Д.М., Свиридов Р.К. Современные данные о морфометрических характеристиках шести предгорных озер Русского Алтая // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 68 (1). С. 5–15. DOI: 10.24412/2410-1192-2023-16801.
5. Русанов Г.Г., Важов С.В., Нерешенные проблемы озер Манжерокское и Ая. Бийск: АГПУ им. В.М. Шукшина, 2017. 168 с.
6. Малолетко А.М., Прудникова Н.Г., Кириллова Т.В. и др. Озеро Ая и его окрестности (физико-географический очерк). Томск: Печатная мануфактура, 2004. 204 с.
7. Русанов Г.Г., Важов С.В., Бахтин Р.Ф. Колыванское озеро: происхождение, геоморфология, экология. Бийск: АГПУ им. В.М. Шукшина, 2016. 168 с.
8. Галахов В.П., Губарев М.С. Водный баланс озера Светлое (Лебедино) // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2018. Т. 3. № 50. С. 10–16.

9. Рычков В.М., Рычкова С.И. Феномен реки Кокши на Алтае // Природные ресурсы Горного Алтая. 2004. № 2. Режим доступа: <http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2015/02/2-20.pdf> (дата обращения 22.04.2022).
10. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 2 / под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. 720 с.
11. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону, 2009. 1150 с.
12. Методы изучения истории озер. Л.: Наука, 1986. 254 с.
13. Кордэ Н.В. Биостратификация и типология русских сапропелей. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 220 с.
14. Тарновский А.А. Геохимия донных отложений современных озер. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. 172 с.
15. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.
16. Оксий О.П., Жукин В.Н., Брагинский Л.П. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал 1993. Т. 29. № 4. С. 62–76.
17. Селедцов Н.Г. Айское, Манжерокское и Теньгинское озёра Горного Алтая // Известия Алтайского отдела Географического общества СССР. 1963. Вып. 2. С. 54–73.
18. Вдовина О.Н., Безматерных Д.М., Крылова Е.Н. Состав и структура сообществ донных беспозвоночных предгорных озер Светлое и Кокша (Алтайский край) // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2022. № 3 (66). С. 33–47. DOI 10.24412/2410-1192-2022-16603.
19. Вдовина О.Н., Безматерных Д.М., Лассый М.В. Макрозообентос предгорных озер Северного и Северо-Восточного Алтая // Чтения памяти В.Я. Леванидова. 2023. Вып. 10. С. 33–40. DOI: 10.25 221/levanidov.10.04.
20. Bezmaternykh D.M., Vdovina O.N. Composition, structure and formation factors of macroinvertebrate communities in low-mountain lakes of the Russian Altai // Acta Biologica Sibirica. 2023. Vol. 9. P. 433–449. DOI: 10.5281/zenodo.8219818.
21. Скорняков В.А., Даценко Ю.С., Масленикова В.В. Картографирование условий самоочищения природных вод // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1997. № 5. С. 62–66.

REFERENCES

1. Gvozdetzky N.A., Mikhailov N.I. Physical geography of the USSR. The Asian part. Moscow: Mysl, 1978. 512 p. (In Russ.).
2. Solovov V.P. Productivity of reservoirs of the Altay Kray and ways of their intensive fishery development. *Biological resources of inland reservoirs of Siberia and the Far East*. М.: Nauka, 1984. P. 13-24 (In Russ.).
3. Rossolimo L.L. Fundamentals of lake typification and limnological zoning. Accumulation of matter in lakes. Moscow: Nauka, 1964. P. 5-46 (In Russ.).
4. Gubarev M.S., Bezmaternykh D.M., Sviridov R.K. Modern data on morphometric characteristics of six foothill lakes of the Russian Altai. *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society*. 2023. No 4 (59). С. 74-82. DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15908 (In Russ.).
5. Rusanov G.G., Vazhov S.V., Unsolved problems of the lakes Manzherokskoye and Aya. Biysk: V.M. Shukshin AGSPU, 2017. 168 p. (In Russ.).
6. Maloletko A.M., Prudnikova N.G., Kirillova T.V. et al. Lake Aya and its surroundings (physical and geographical sketch). Tomsk: Pechatnaya Manufactura Pabl., 2004. 204 p. (In Russ.).
7. Rusanov G.G., Vazhov S.V., Bakhtin R.F. The Lake Kolyvan: origin, geomorphology, ecology. Biysk: V.M. Shukshin AGSPU, 2016. 168 p. (In Russ.).
8. Galakhov V.P., Gubarev M.S. Water balance of lake Svetloe (Lebedinoe). *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society*. 2018. Vol. 3. No 50. P. 10-16. (In Russ.).
9. Rychkov V.M., Rychkova S.I. The phenomenon of the Koksha River in Altai. *Natural resources of the Altay Mountains*. 2004. № 2. URL: <http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2015/02/2-20.pdf>. (accessed: 04/22/2022) (In Russ.).

10. Manual on chemical analysis of surface waters of the land. Part 2 / Edited by L.V. Boeva. Rostov-on-Don: Southern Federal University Publ., 2012. 720 p. (In Russ.).
11. Manual on chemical analysis of surface waters of the land. Part 1 / Edited by L.V. Boeva. Rostov-on-Don, 2009. 1150 p. (In Russ.).
12. Methods of studying the history of lakes (Series: History of lakes). Leningrad: Nauka, 1986. 254 p. (In Russ.).
13. Korde N.V. Bio/stratification and typology of Russian sapropels. M.: USSR Academy of Sciences Publications, 1960. 220 p. (In Russ.).
14. Tarnovsky A.A. Geochemistry of bottom sediments of modern lakes. Leningrad: Leningrad University Publications, 1980. 172 p. (In Russ.).
15. Alekin O.A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970. 444 p. (In Russ.).
16. Oksiyuk O.P., Zhukinsky V.N., Braginsky L.P., etc. Complex ecological classification of the quality of surface waters of the land. *Hydrobiological Journal*. 1993. Vol. 29. No. 4. P. 62-76. (In Russ.).
17. Seledtsov N.G. Aiskoye, Manzherokskoye and Tenginskoye lakes of the Altay Mountains. *Bulletin of the Altay Branch of the Geographical Society of the USSR*. 1963. Iss. 2. P. 54-73. (In Russ.).
18. Vdovina O.N., Bezmaternykh D.M., Krylova E.N. Composition and structures of the bottom invertebrates communities of the foothills lakes Svetloye and Koksha (Altay Kray). *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society*. 2022. No 3(66). P. 33-47. DOI: 10.24412/2410-1192-2022-16603 (In Russ.).
19. Vdovina O.N., Bezmaternykh D.M., Lassy M.V. Macroinvertebrates the foothill lakes of the northern and Northeastern Altay. *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*. 2023. Is. 10. P. 33-40. DOI: 10.25 221/levanidov.10.04, <https://elibrary.ru/jmtqev> (In Russ.).
20. Bezmaternykh D.M., Vdovina O.N. Composition, structure and formation factors of macroinvertebrate communities in low-mountain lakes of the Russian Altay. *Acta Biologica Sibirica*. 2023. Vol. 9. P. 433-449. DOI: 10.5281/zenodo.8219818
21. Skorniyakov V.A., Dotsenko Yu.S., Maslennikova V.V. Mapping conditions of self-purification of natural waters. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 1997. No. 5. P. 62-66. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Безматерных Дмитрий Михайлович, д-р биол. наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-7747-4939; e-mail: bezmater@iwep.ru

Вдовина Ольга Николаевна, канд. биол. наук, научный сотрудник, лаборатория гидробиологии, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-2479-3338; e-mail: olgazhukova1984@yandex.ru

About the authors

Dmitry M., Bezmaternykh, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Deputy Director, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-7747-4939; e-mail: bezmater@iwep.ru

Olga N. Vdovina, PhD in Biology, Researcher of the Laboratory of Hydrobiology, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-2479-3338; e-mail: olgazhukova1984@yandex.ru